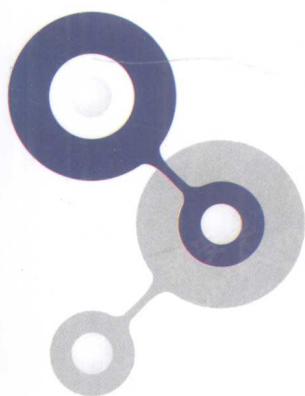




高等学校机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划教材



工程材料及成型工艺

主编 刘春廷 汪传生·马 继
主审 赵 程



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划教材

工程材料及成型工艺

主 编 刘春廷 汪传生 马 继

副主编 赵海霞 李镇江

参 编 马伯江 张 淼 丛海燕

主 审 赵 程

西安电子科技大学出版社

2009

【内 容 简 介】

本书根据教育部最新颁布的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”和“工程材料及机械制造基础系列课程改革”的精神编写而成,在内容和形式上较之前的教材有较大的更新。

全书共八章,含有以往《工程材料》和《热加工工艺基础》两本教材中的相关知识,其具体内容包括:材料学基础、金属材料及成型工艺、非金属材料及成型工艺、新型工程材料、零部件的失效与材料及成型工艺的选用。为配合学习,各章末均附有习题和思考题,便于读者深入研究。

本书语言简洁,信息量大,科学性、实用性强,内容新颖,引入了新材料、新技术、新成果和新进展,有利于培养学生的创新意识,拓宽读者专业知识面,便于读者了解当前国内外先进材料技术、成型工艺和方法的发展趋势。

本书适用教学时数为 48~64 学时,可作为机械类专业技术基础课程“工程材料及机械制造基础”的教学用书,主要面向机械类专、本科学生,也可供近机类专业选用和有关工程技术人员学习参考。

★本书配有电子教案,需要者可在出版社网站下载。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及成型工艺 / 刘春廷, 汪传生, 马继主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.1

高等学校机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2162-3

I. 工… II. ①刘… ②汪… ③马… III. 工程材料—成型—工艺—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 188466 号

策 划 毛红兵

责任编辑 任倍萱 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子信箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 20.5

字 数 484 千字

印 数 1~4000 册

定 价 29.00 元

ISBN 978-7-5606-2162-3/TB · 0014

XDUP 2454001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

“十一五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦 力 王建中 巨永锋 孙 强 陈在平 李正明
吴 斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高 嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策 划：毛红兵 马武装 马晓娟

前 言

“工程材料及成型工艺”是高等院校机械类和近机械类专业一门重要的技术基础课。随着科学技术的发展,新材料和新技术的不断问世及应用,对工程材料及成型工艺的教学工作也提出了新的要求。本书是以教育部最新颁布的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”和“工程材料及机械制造基础系列课程改革”为指导,结合目前教改的基本指导思想 and 原则以及实施素质教育和加强技术创新的精神,根据高等学校机械类教学的实际需要,编写而成的。作为机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划系列教材之一,供各高等院校使用。

本书以材料的性能—结构—组织—工艺这一普遍规律为主线,将理论与工艺融为一体,较全面地介绍了工程材料的基本理论知识和成型工艺的基本原理、工艺方法和技术要点,适当地反映了当代科技在工程材料及成型领域的新成就。全书共八章,第1章着重阐述材料学基础,包括材料的性能、结构、组织、热处理工艺等;第2章着重阐述金属材料,包括工业用钢、铸铁、有色金属及其合金;第3~5章分别阐述金属材料的成型工艺,即铸造、锻压、焊接;第6章着重阐述非金属材料及成型,包括高分子材料及成型、陶瓷材料及成型和复合材料及成型;第7章主要介绍新型材料,包括形状记忆合金、非晶态合金、超塑性合金、纳米材料等;第8章介绍了机械零件的失效与材料及成型工艺的选用。

本书由长期从事工程材料及成型工艺教学的教师及科研工作者编写而成。全书由青岛科技大学的刘春廷、汪传生和马继担任主编,刘春廷负责统稿,青岛科技大学赵程教授负责主审。参与编写工作的成员还有:赵海霞、李镇江、马泊江、张淼和丛海燕。

在本书的编写过程中,中国科学院金属研究所的胡壮麒院士、管恒荣研究员和孙晓峰研究员提出了许多宝贵的意见,在此谨表示深切的谢意!

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2008 年 11 月

目 录

绪论	1
第 1 章 材料学基础	4
1.1 工程材料的性能	4
1.1.1 材料的使用性能	4
1.1.2 材料的工艺性能	14
1.2 工程材料的结构	15
1.2.1 材料的结合方式	15
1.2.2 金属材料结构	18
1.2.3 高分子材料的结构	27
1.2.4 陶瓷材料的结构	30
1.3 金属材料的结晶	31
1.3.1 纯金属的结晶	31
1.3.2 二元相图	33
1.3.3 铁碳相图	42
1.4 钢的热处理	55
1.4.1 钢在加热时的转变	55
1.4.2 钢在冷却时的转变	59
1.4.3 钢的常规热处理	72
1.4.4 钢的表面热处理	90
1.4.5 钢的热处理新技术	99
思考题与习题	103
第 2 章 金属材料	105
2.1 工业用钢	105
2.1.1 钢的分类与牌号	105
2.1.2 钢中的合金元素与杂质	107
2.1.3 结构钢	111
2.1.4 工具钢	120
2.1.5 特殊性能钢	128
2.2 铸铁	135
2.2.1 概述	135
2.2.2 常用铸铁	138
2.2.3 合金铸铁	148
2.3 有色金属及其合金	150
2.3.1 铝及铝合金	150

2.3.2 铜及其合金	153
2.3.3 轴承合金	154
2.3.4 镁及镁合金	156
2.3.5 钛及钛合金	157
思考题与习题	158
第3章 铸造	159
3.1 铸造工艺基础	159
3.1.1 液态合金的充型	159
3.1.2 铸件的收缩	161
3.2 砂型铸造	165
3.2.1 砂型铸造工艺	165
3.2.2 砂型铸造方法	170
3.3 特种铸造	174
3.3.1 熔模铸造	174
3.3.2 金属型铸造	176
3.3.3 压力铸造	177
3.3.4 低压铸造	178
3.3.5 离心铸造	178
3.3.6 铸造方法的选择	178
3.4 铸件结构工艺性	179
3.5 常用合金铸件的铸造	184
3.5.1 铸铁件的铸造	184
3.5.2 铸钢件的铸造	188
3.5.3 有色金属及其合金铸件的铸造	189
3.6 铸造技术的发展	191
思考题与习题	192
第4章 锻压	193
4.1 金属的塑性变形	194
4.1.1 金属塑性变形的实质	194
4.1.2 塑性变形对金属组织及性能的影响	196
4.1.3 金属的锻造性能	198
4.2 锻造	200
4.2.1 自由锻	200
4.2.2 模锻	203
4.3 板料冲压	205
4.3.1 板料冲压基本工序	206
4.3.2 冲压模具	208
4.4 挤压、轧制、拉拔	210
4.4.1 挤压	210

4.4.2 轧制	211
4.4.3 拉拔	213
4.5 特种塑性加工方法	214
4.5.1 超塑性成型	214
4.5.2 高能率成型	217
4.5.3 液态模锻	218
4.5.4 粉末锻造	219
4.6 塑性加工零件的结构工艺性	220
4.6.1 自由锻件的结构工艺性	220
4.6.2 冲压件的结构工艺性	221
4.7 塑性加工技术新进展	223
思考题与习题	225
第5章 焊接	226
5.1 焊接基础知识	226
5.2 常用焊接工艺方法	232
5.2.1 手工电弧焊	232
5.2.2 其他焊接方法	238
5.3 焊接件结构工艺性	244
5.4 常用金属材料的焊接	245
5.4.1 金属材料的焊接性	245
5.4.2 结构钢的焊接	246
5.4.3 铸铁件的焊接	248
5.4.4 有色金属及合金的焊接	248
5.5 焊接质量检测	249
5.5.1 焊接缺陷	249
5.5.2 常用检验方法	250
5.6 焊接技术新进展	252
思考题与习题	255
第6章 非金属材料及成型	256
6.1 高分子材料及成型	256
6.1.1 工业橡胶及成型	259
6.1.2 工程塑料及成型	262
6.1.3 合成纤维及成型	266
6.2 陶瓷材料及成型	268
6.2.1 陶瓷材料的组成	268
6.2.2 陶瓷材料的分类	270
6.2.3 陶瓷材料的成型	270
6.3 复合材料及成型	273
6.3.1 复合材料的分类	274

6.3.2 复合材料的成型	275
思考题与习题	282
第 7 章 新型材料	283
7.1 形状记忆合金	283
7.1.1 形状记忆效应	283
7.1.2 形状记忆效应的机理	283
7.1.3 形状记忆合金的应用	284
7.2 非晶态合金	285
7.2.1 非晶态合金的制备	286
7.2.2 非晶态合金的特性	286
7.2.3 非晶态合金的应用	287
7.3 超塑性合金	288
7.3.1 超塑性现象	288
7.3.2 超塑性合金	289
7.3.3 超塑性合金的应用	290
7.4 纳米材料	291
7.4.1 纳米材料的特性	291
7.4.2 纳米材料的分类	292
7.4.3 纳米材料的制备	293
7.4.4 纳米新材料	293
7.4.5 纳米复合材料	294
7.4.6 功能纳米复合材料	294
7.5 纳米材料的应用	295
第 8 章 机械零件的失效与材料及成型工艺的选用	297
8.1 机械零件的失效	297
8.1.1 失效概念	297
8.1.2 失效形式	297
8.1.3 失效原因	300
8.1.4 失效分析	300
8.2 机械零件材料及成型工艺的选用	304
8.2.1 机械零件材料及成型工艺选用的基本原则	304
8.2.2 典型零件的材料及成型工艺选择	309
思考题与习题	316
参考文献	317

绪 论

1. 概述

材料是人们用来制作各种有用器件的物质,是人们的生活和生产所必需的物质基础。从日常生活用具到高新技术产品,都是用各种材料制作或由其加工的零件组装而成的。

纵观人类发展史,人类社会的发展伴随着材料的发明和发展,材料的发展又推动着人类社会的进步,并成为人类文明发展的里程碑。人类最早使用的材料是石头、兽皮等天然材料,其后,又发明了陶器、瓷器、青铜器和铁器等。因此,历史学家将人类早期的历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。人类文明的发展史,就相当于一部学习利用材料、制造材料、创新材料的历史,材料的发展水平和利用程度已成为人类文明进步的标志。在 20 世纪后期,材料作为高新技术的三大支柱(能源、材料和信息)之一已得到高速发展,主要体现为新材料的不断涌现,非金属人工合成材料的迅猛增长,金属与非金属材料的相互渗透,新型复合材料的异军突起,等等。如今,人类已进入人工合成材料的崭新时代。新材料对高科技和新技术具有非常关键的作用,掌握新材料是一个国家在科技上处于领先地位的标志之一,没有新材料,也就没有发展高科技的物质基础。如没有半导体材料的工业化生产,就不可能有目前的计算机技术;没有高温高强度的结构材料,就不可能有今天的航空工业和宇航工业;没有低消耗的光导纤维,就没有现代的光纤通信。进入 21 世纪,新型工程材料的发展趋势如下:继续重视对新型金属材料的研究开发,开发非晶合金材料,发展在分子水平上设计高分子材料的技术,继续发掘复合材料和半导体硅材料的潜在价值,大力发展纳米材料、信息材料、智能材料、生物材料和高性能陶瓷材料等。

中华民族在人类历史上为材料的发展和应用作出过重大贡献。早在公元前 6000~5000 年的新石器时代,中华民族的先人就能用黏土烧制陶器,到东汉时期又出现了瓷器,并流传海外。4000 年前的夏朝,我们的祖先已经能够炼铜,到殷、商时期,我国的青铜冶炼和铸造技术已达到很高水平。从河南安阳晚商遗址出土的司母戊方鼎(图 0-1),重 875 kg,通高 133 cm,口长 110 cm,宽 78 cm,壁厚 6 cm,且饰纹优美。司母戊方鼎是我国商代青铜器的代表作,标志着商代青铜器铸造技术的水平,被推为“世界出土青铜器之冠”。从湖北江陵楚墓中发掘出的两把越王勾践的宝剑(图 0-2),长 55.6 cm,至今锋利异常,是我国青铜器的杰作。我国从春秋战国时期(公元前 770~221 年)便开始大量使用铁器,明朝科学家宋应星在其所著的《天工开物》一书中就记载了古代的渗碳热处理等工艺,这说明早在欧洲工业革命之前,我国在金属材料及热处理方面就已经有了较高的成就。中华人民共和国成立后,我国先后建起了鞍山、攀枝花、宝钢等大型钢铁基地,钢产量由 1949 年的 15.8 万吨上升到现在的一亿吨,成为世界钢产量大国之一。原子弹、氢弹的爆炸,卫星、飞船的上天等都说明了我国在材料的开发、研究及应用等方面有了飞跃的发展,并达到了一定的水平。但与世界发达国家相比,我们还存在着一定的差距,需要我们一代代地努力去缩小这些差距。

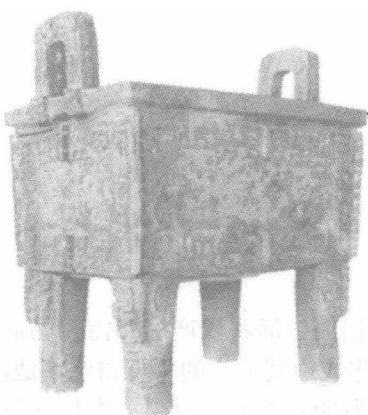


图 0-1 司母戊方鼎



图 0-2 越王勾践剑

从简单地利用天然材料、冶铜炼铁到使用热处理工艺，人类对材料的认识是逐步深入的。18 世纪欧洲工业革命后，人们对材料的质量和数量的要求越来越高，这促进了材料科技的进一步发展。1863 年，光学显微镜首次应用于金属材料的研究，从而诞生了金相学，人们开始步入材料的微观世界。将材料的宏观性能与微观组织联系起来，标志着材料研究从经验走向科学。1912 年，科学家们发现了 X-射线对晶体的衍射作用，并将之用于晶体衍射结构分析，使人们对固体材料微观结构的认识从最初的假想发展到科学的现实。19 世纪末，晶体的 230 种空间群被确定，至此人们已经可以完全用数学的方法来描述晶体的几何特征。1932 年，电子显微镜的发明把人们带到了微观世界的更深层次(10^{-7} m)。1934 年，位错理论更深层次地解决了晶体理论计算强度与实验测得的实际强度之间存在的巨大矛盾的矛盾，对于人们认识材料的力学性能及设计高强度材料具有划时代的意义。与此同时，一些与材料有关的基础学科(如固体物理、量子力学、化学等)的发展也有力地促进了材料研究的深化。

2. 工程材料的分类

工程材料主要是指用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料，用来制造工程构件和机械零件，也包括一些用于制造工具的材料和具有特殊性能(如耐蚀、耐高温等)的材料。按照材料的组成、结合键的特点，可将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。

1) 金属材料

金属材料是以金属键结合为主的材料，具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽，是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两大类。铁及铁合金称为黑色金属，即钢、铸铁材料，其世界年产量已达 10 亿吨，在机械产品中的用量已占整个用材的 60%以上。除黑色金属之外的所有金属及其合金统称为有色金属。有色金属的种类很多，根据其特性的不同又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属等。

2) 高分子材料

高分子材料是以分子键和共价键为主的材料。作为结构材料的高分子材料，具有塑性好、耐蚀性好、电绝缘性好、减振性好及密度小等特点。工程上使用的高分子材料主要包

括塑料、橡胶及合成纤维等,在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造工业和化学、交通运输、航空航天等工业中被广泛应用。

3) 陶瓷材料

陶瓷材料是以共价键和离子键结合为主的材料,其性能特点是熔点高、硬度高、耐腐蚀、脆性大。陶瓷材料分为传统陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷三大类。传统陶瓷又称普通陶瓷,是以天然材料(如黏土、石英、长石等)为原料的陶瓷,主要用作建筑材料。特种陶瓷又称精细陶瓷,是以人工合成材料为原料的陶瓷,常用于制作工程上的耐热、耐蚀、耐磨零件。金属陶瓷是金属与各种化合物粉末的烧结体,主要用作工程模具。

4) 复合材料

复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料,通过这种组合来达到进一步提高材料性能的目的。它主要包括金属基复合材料、陶瓷基复合材料和高分子复合材料。如现代航空发动机燃烧室内温度最高的材料就是通过粉末冶金法制备的氧化物粒子弥散强化的镍基合金复合材料。很多高级游艇、赛艇及体育器械等都是由碳纤维复合材料制成的,它们具有重量轻、弹性好、强度高等优点。

工程材料及成型工艺是以工程材料及零部件的成型工艺为研究对象的一门综合性技术课程。它以凝聚态物理和物理化学、晶体学为理论基础,结合冶金、机械、化工等科学知识,探讨材料的成分、工艺、组织结构及性能之间的内在规律,并联系一个器件或构件的使用功能要求,力求用经济合理的办法制备出一个有效的器件或构件。因此,工程材料及成型工艺是现代机械工程、电子技术和高技术工业发展的基础。它的研究内容包括:材料学基础(包括材料的性能、结构、热处理工艺等)、金属材料及成型(铸造、锻压、焊接)、非金属材料及成型、新型工程材料和零部件的失效与材料及成型工艺的选用,特别是材料的性能与组织结构、成型工艺之间的关系更是本书研究的重点。

3. “工程材料及成型工艺”课程的目的、性质和学习要求

随着经济的飞速发展和科学技术的进步,对材料性能的要求越来越苛刻,结构材料向高比强、高刚度、高韧性、耐高温、耐腐蚀、抗辐照和多功能的方向发展,新材料也在不断地涌现。机械工业是材料应用的重要领域,随着机械工业的发展,对产品的要求越来越高。无论是制造机床,还是建造轮船、石油化工设备,都要求产品的技术先进、质量高、寿命长、造价低。因此,在产品设计与制造过程中,会遇到越来越多的材料及材料加工方面的问题。这就要求机械工程技术人員掌握必要的材料科学与材料工程知识,具备正确选择材料和加工方法、合理安排加工工艺路线的能力。

工程材料及成型工艺课是机械类和近机类各专业的技术基础课,课程的目的是使学生获得工程材料的基本理论知识及其性能特点,建立材料的化学成分、组织结构、成型工艺与性能之间的关系,了解常用材料的应用范围和成型工艺,初步具备合理选用材料与工艺、正确确定加工方法、妥善安排加工工艺路线的能力。

工程材料及成型工艺课程是一门理论性和实践性都很强的课程,特点是基本概念多,与实际联系密切。因此要求在学习时注意联系物理、化学、工程力学及金属工艺学等课程的相关内容,并结合生产实际,注重分析、理解前后知识的整体联系和综合应用。

第1章 材料学基础

1.1 工程材料的性能

工程材料具有许多良好的性能,因此被广泛地应用于制造各种构件、机械零件、工具和日常生活用具等。为了正确地使用工程材料,应充分了解和掌握材料的性能。通常所说工程材料的性能有两个方面的意义:一是材料的使用性能,指材料在使用条件下表现出的性能,如强度、塑性、韧性等力学性能,耐蚀性、耐热性等化学性能以及声、光、电、磁等物理性能;二是材料的工艺性能,指材料在加工过程中表现出的性能,如冷热加工、压力加工性能、焊接性能、铸造性能、切削性能,等等。工程材料是材料科学的应用部分,本节主要讨论结构材料的力学性能,阐述结构材料的组织、成分和性能的相互影响规律,解答工程应用问题。

1.1.1 材料的使用性能

1. 力学性能

工程材料的力学性能亦称为机械性能,是指材料抵抗各种外加载荷的能力,包括弹性、刚度、强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度等。常见的各种外载荷形式如图 1-1 所示。我们将借助以下拉伸试验对各相关力的性能作一介绍。

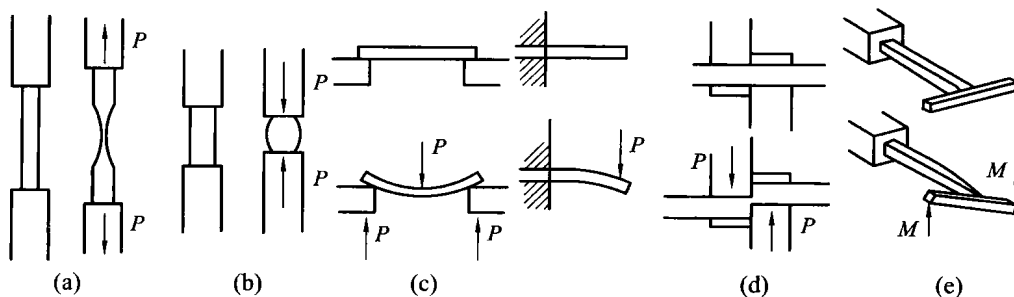


图 1-1 常见的各种外载荷形式

(a) 拉伸载荷; (b) 压缩载荷; (c) 弯曲载荷; (d) 剪切载荷; (e) 扭转载荷

在材料拉伸试验机上对一截面为圆形的低碳钢拉伸试样(图 1-2)进行拉伸试验,可得到应力与应变的关系图,即拉伸图。图 1-3 是低碳钢和铸铁的应力—应变曲线。图中的纵坐标为应力 $\sigma(\text{MPa})$,横坐标为应变 ϵ ,它们的计算公式分别为:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1-1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

上两式中： P 为所加外载荷(N)； A_0 为试样原始截面积(m^2)； l_0 为试样的原始标距长度(mm)； l 为试样变形后的标距长度(mm)； Δl 为伸长量(mm)。

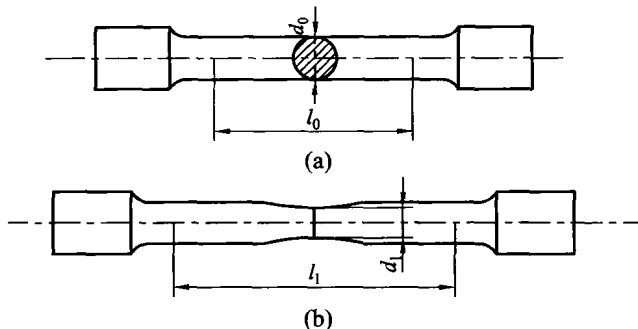
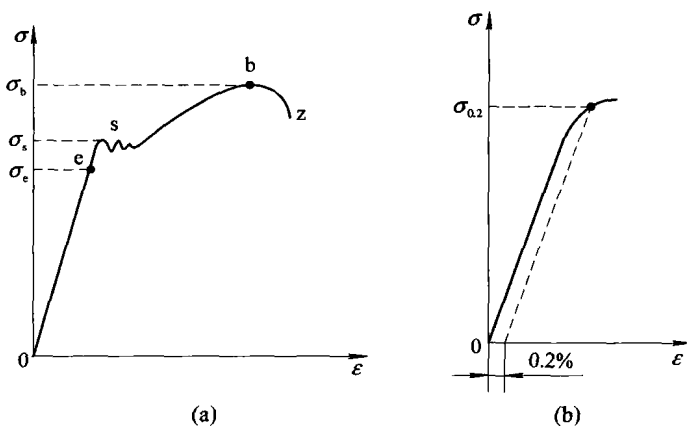


图 1-2 圆形拉伸试样

(a) 拉伸前；(b) 拉伸后

图 1-3 低碳钢和铸铁的 σ — ε 曲线

(a) 低碳钢；(b) 铸铁

1) 强度

材料在外力作用下抵抗变形与断裂的能力称为强度。根据外力作用方式的不同，强度有多种指标，如抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪切强度和抗扭强度等。其中抗拉强度和屈服强度指标应用最为广泛。

(1) 静载时的强度。

首先，我们来分析拉伸变形的几个阶段：

0e：弹性变形阶段。试样的变形量与外加载荷成正比，载荷卸掉后，试样恢复到原来的尺寸。

es 段：屈服阶段。此阶段试样不仅发生弹性变形，还发生了塑性变形，即载荷卸掉后，一部分形变恢复，还有一部分形变不能恢复。形变不能恢复的形变称为塑性变形。

sb 段：强化阶段。为使试样继续变形，载荷必须不断增加，随着塑性变形的增大，材料变形抗力也逐渐增加。

bz 段：颈缩阶段。当载荷达到最大值时，试样的直径发生局部收缩，称为颈缩。此时，变形所需的载荷逐渐降低。

z 点：试样断裂。试样在此点发生断裂。

通过以上分析，可知：

① 弹性(elasticity)与刚度(rigidity 或 stiffness)。在应力—应变曲线上，0e 段为弹性变形阶段，即卸载后试样恢复原状，这种变形称为弹性变形。e 点的应力 σ_e 称为弹性极限。弹性极限值表示材料保持弹性变形，不产生永久变形的最大应力，是弹性零件的设计依据。

材料在弹性范围内，应力与应变的关系符合虎克定律：

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1-3)$$

式中， σ 为外加的应力； ε 为相应的应变； E 为弹性模量(MPa)。

式(1-3)也可改写为 $E=\sigma/\varepsilon$ ，所以 E 是应力—应变曲线(0e 直线)的斜率。斜率越大，表示弹性模量越大，弹性变形越不易进行。因此， E 是衡量材料抵抗弹性变形的能力，即表征零件或构件保持原有形状与尺寸的能力，所以也称做材料的刚度。也可以说，材料的弹性模量 E 越大，它的刚度就越大。

E 值是一个对组织不敏感的性能指标，主要取决于原子间的结合力，与材料本性、晶格类型、晶格常数有关，而与显微组织无关。因此一些处理方法(如热处理、冷热加工、合金化等)对它影响很小。而零件的刚度大小则取决于零件的几何形状和材料的种类(即材料的弹性模量)，若想提高金属制品的刚度，只能更换金属材料、改变金属制品的结构形式或增加截面面积。

② 屈服强度(yielding strength)。如图 1-3 所示，当外加应力超过 σ_e 点时，卸载后试样的伸长只能部分恢复。这种不随外力去除而消失的变形称为塑性变形。当应力增加到 σ_s 点时，图上出现了平台。这种外力不增加而试样继续发生变形的现象称为屈服。材料开始产生屈服时的最低应力 σ_s 称为屈服强度。

工程上使用的材料多数没有明显的屈服现象。这类材料的屈服强度在国标中规定以试样的塑性变形量为试样标距的 0.2% 时的材料所承受的应力值来表示，即用符号 $\sigma_{0.2}$ 表示(图 1-3(b))。它是 $F_{0.2}$ 与试样原始横截面积 A_0 之比。零(构)件在工程中一般不允许发生塑性变形，所以屈服强度 σ_s 是设计时的主要参数，是材料的重要机械性能指标。

③ 抗拉强度(tensile strength)。材料发生屈服后，其应力与应变的关系曲线如图 1-3 中的 sb 小段，到 b 点，应力达最大值 σ_b ，b 点以后，试样的横截面产生局部颈缩，迅速伸长，这时试样的伸长主要集中在缩颈部位，直至拉断。将材料受拉时所能承受的最大应力值 σ_b 称为抗拉强度。 σ_b 是机械零(构)件评定和选材时的重要强度指标。

σ_s 与 σ_b 的比值叫做屈强比。屈强比愈小，工程构件的可靠性愈高，即万一超载也不致于马上断裂。屈强比若太小，则材料强度有效利用率也就太低。

金属材料的强度与化学成分、工艺过程和冷热加工，尤其是热处理工艺有密切关系。例如，对于退火状态的三种铁碳合金，碳质量分数分别为 0.2%、0.4% 和 0.6%，则它们的抗

拉强度分别为 350 MPa、500 MPa 和 700 MPa；碳质量分数为 0.4% 的铁碳合金淬火和高温回火后，抗拉强度可提高到 700~800 MPa；合金钢的抗拉强度可达 1000~1800 MPa。但铜合金和铝合金的抗拉强度明显提高，如铜合金的 σ_b 达 600~700 MPa，铍铜合金经过固溶时效处理后， σ_b 最高为 1250 MPa；铝合金的 σ_b 一般为 400~600 MPa。

(2) 动载荷时的强度。

动载时最常用的指标是疲劳强度，它是指在大小和方向重复循环变化的载荷作用下材料抵抗断裂的能力。

许多机械零件，如曲轴、齿轮、轴承、叶片和弹簧等，在工作中各点承受的应力随时间作周期性的变化，这种随时间作周期性变化的应力称为交变应力。在交变应力作用下，零件所承受的应力虽然低于其屈服强度，但经过较长时间的工作也会产生裂纹或突然断裂，这种现象称为材料的疲劳。据统计，大约有 80% 以上的机械零件失效是由疲劳失效造成的。

测定材料疲劳寿命的试验有许多种，最常用的一种是旋转梁试验，即试样在旋转时交替承受大小相等的交变拉压应力。可将试验所得数据绘成 $\sigma-N$ 疲劳曲线， σ 为产生失效的应力， N 为应力循环次数。

图 1-4 所示为中碳钢和高强度铝合金的典型 $\sigma-N$ 曲线(疲劳曲线)。对于中碳钢，随着承受的交变应力越大，断裂时应循环的次数越少；反之，循环次数越大。随着应力循环次数的增加，疲劳强度逐渐降低，以后曲线逐渐变平，即循环次数再增加时，疲劳强度也不降低。当应力降低至一定值时，试样可经受无限个周期循环而不破坏， $\sigma-N$ 曲线出现水平部分所对应的定值称为疲劳强度(疲劳极限)，用 σ_r 表示。对于应力对称循环的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。实际上，材料不可能作无限次交变应力试验。对于黑色金属，一般规定应力循环 10^7 周次而不断裂的最大应力称为疲劳极限，有色金属、不锈钢等取 10^8 周次时的最大应力为疲劳极限。许多铁合金的疲劳极限约为其抗拉强度的一半，有色金属(如铝合金)没有疲劳极限，其疲劳强度可以低于抗拉强度的 1/3。

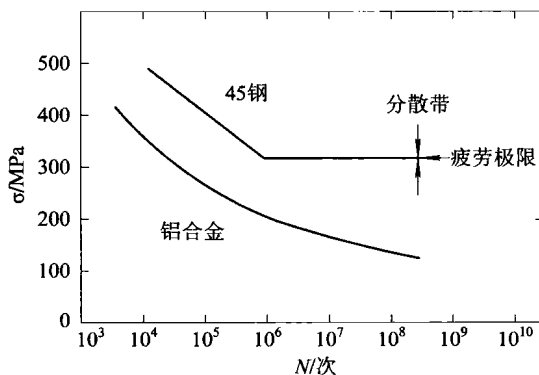


图 1-4 中碳钢和高强度铝合金的 $\sigma-N$ 曲线

(3) 高温强度。

蠕变是指在高温下长时间工作的金属材料或在常温使用的高聚物，承受的应力即使低于屈服点 σ_s 也可能出现明显缓慢的塑性变形直至断裂，从而导致零件的最终失效。若金属材料在高于一定温度的环境下长时间工作，材料的强度就不能完全用室温下的强度(σ_s 或 σ_b)来代替，此时必须考虑温度和时间的影响。材料的高温强度要用蠕变极限和持久强度来

表示。蠕变极限是指金属在给定温度下和规定时间内产生一定变形量的应力。例如 $\sigma_{0.1/1000}^{600}=88\text{ MPa}$, 表示在 600°C 下, 1000 h 内, 引起 0.1% 变形量的应力值为 88 MPa。持久

强度是指金属在给定温度和规定时间内, 使材料发生断裂的应力。例如 $\sigma_{100}^{800}=186\text{ MPa}$, 表示工作温度为 800°C 时, 承受 186 MPa 的应力作用, 约 100 h 后断裂。

工程塑料在室温下受到应力作用就可能发生蠕变, 这在使用塑料受力件时应予以注意。

2) 硬度(hardness)

硬度是指材料抵抗另一硬物体压入其内而产生局部塑性变形的能力。通常, 材料越硬, 其耐磨性越好。同时, 通过硬度值可估计材料的近似 σ_b 值。硬度试验方法比较简单、迅速, 可直接在原材料或零件表面上测试, 因此被广泛应用。常用的硬度测量方法是压入法, 主要有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)等。陶瓷等材料还常用克努普氏显微硬度(HK)和莫氏硬度(划痕比较法)作为硬度指标。

(1) 布氏硬度(Brinell Hardness)。

图 1-5 所示为布氏硬度测试原理图。用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球, 在一定载荷 P 的作用下压入试样表面, 保持规定的时间后卸除载荷, 在试样表面留下球形压痕。测量其压痕直径, 计算硬度值。布氏硬度值是用球冠压痕单位面积上所承受的平均压力来表示, 符号为 HBS(当用钢球压头时)或 HBW(当用硬质合金时), 即

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-4)$$

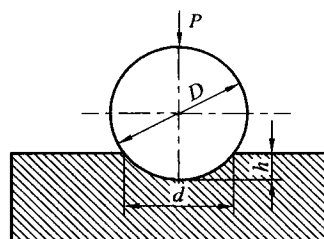


图 1-5 布氏硬度试验原理图

式中, P 为荷载(N); D 为球体直径(mm); d 为压痕平均直径(mm)。

在试验中, 硬度值不需计算, 而是用刻度放大镜测出压痕直径 d , 然后对照有关资料查出相应的布氏硬度值。

布氏硬度为 200HBS10/1000/30, 表示用直径为 10 mm 的钢球, 在 9800 N(1000 kgf)的载荷下保持 30 s 时测得布氏硬度值为 200。如果钢球直径为 10 mm, 载荷为 29 400 N(3000 kgf), 保持 10 s, 硬度值为 200, 可简单表示为 200 HBS。

淬火钢球用以测定硬度小于 450 HB 的金属材料, 如灰铸铁、有色金属及经退火、正火和调质处理的钢材, 其硬度值以 HBS 表示。布氏硬度在 450~650 HB 之间的材料, 压头用硬质合金球, 其硬度值用 HBW 表示。

布氏硬度的优点是具有较高的测量精度, 因其压痕面积大, 可比较真实地反映出材料的平均性能。另外, 由于布氏硬度与 σ_b 之间存在一定的经验关系, 如热轧钢的 $\sigma_b=(3.4\sim 3.6)\text{HBS}$, 冷变形铜合金 $\sigma_b\approx 4.0\text{ HBS}$, 灰铸铁 $\sigma_b\approx (2.7\sim 4.0)\text{HBS}$, 因此也得到广泛的应用。布氏硬度的缺点是不能测定高硬度材料。

(2) 洛氏硬度(Rockwell Hardness)。

图 1-6 所示为洛氏硬度测量原理图。将金刚石压头(或钢球压头)在先后施加两个载荷(预